УДК 621.311.001

ВСЕРЕЖИМНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый

Томский политехнический университет
E-mail: Svech@tpu.ru

Рассмотрены обоснование и синтез математической модели линий электропередачи, позволяющей воспроизводить весь спектр нормальных и аварийных процессов в трехфазных линиях электропередачи различной протяженности с учетом электромагнитного взаимовлияния параллельных цепей и возможного коронирования.

Исходной основой при любом способе математического моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС) служат математические модели элементов ЭЭС, от точности которых зависит достоверность результатов моделирования. Нередко других критериев ее оценки, особенно при воспроизведении сложных аварийных процессов, нет.

В сложившейся практике математического моделирования реальных ЭЭС линии электропередачи (ЛЭП) моделируются алгебраическими уравнениями П-образной схемы замещения.

Значительное усложнение современных ЭЭС и насыщение их быстродействующими средствами релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики, а также внедрение более быстродействующего коммутационного оборудования, ставит задачу повышения точности моделирования аварийных процессов в ЭЭС. Причиной этому служит также постоянно значительное число тяжелых аварий, из-за недостаточно полной и достоверной информации моделирования, используемой при проектировании и эксплуатации.

Поэтому разработка математической модели трехфазных ЛЭП, обеспечивающей адекватное воспроизведение непрерывного спектра нормальных и аварийных процессов в ней является весьма актуальной.

В отличие от прочих элементов ЭЭС, физическая сущность которых позволяет обоснованно считать их элементами с сосредоточенными параметрами, для ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения длиной l>50 км целесообразен учет распределённости параметров, а также нередко возникающего коронирования, которое влияет на потери в ЛЭП и на электромагнитные процессы в целом. Еще одним фактором, который следует учитывать в математической модели ЛЭП, является электромагнитное взаимовлияние параллельных цепей.

Система телеграфных уравнений и электрофизическая схема замещения малого участка или i-ой ЛЭП в целом определяют исходной математической основой любой модели ЛЭП, общеизвестную систему уравнений:

$$(L_{\Phi i}-M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{Ai}}{\partial t}+r_{\Phi i}i_{Ai}+$$
$$+(L_{3i}+3M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{0i}}{\partial t}+r_{3i}3i_{0i}=-\frac{\partial u_{Ai}}{\partial l_i};$$
$$(L_{\Phi i}-M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{Bi}}{\partial t}+r_{\Phi i}i_{Bi}+$$
$$+(L_{3i}+3M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{0i}}{\partial t}+r_{3i}3i_{0i}=-\frac{\partial u_{Bi}}{\partial l_i};(L_{\Phi i}-M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{Ci}}{\partial t}+$$
$$+r_{\Phi i}i_{Ci}+(L_{3i}+3M_{\text{М}\Phi i})\frac{\partial i_{0i}}{\partial t}+r_{3i}3i_{0i}=-\frac{\partial u_{Ci}}{\partial l_i};$$
$$C_{\Phi i}\frac{\partial u_{Ai}}{\partial t}+3C_{\text{М}\Phi i}\frac{\partial(u_{Ai}-u_{0i})}{\partial t}=-\frac{\partial i_{Ai}}{\partial l_i};$$
$$C_{\Phi i}\frac{\partial u_{Bi}}{\partial t}+3C_{\text{М}\Phi i}\frac{\partial(u_{Bi}-u_{0i})}{\partial t}=-\frac{\partial i_{Bi}}{\partial l_i};$$
$$C_{\Phi i}\frac{\partial u_{Ci}}{\partial t}+3C_{\text{М}\Phi i}\frac{\partial(u_{Ci}-u_{0i})}{\partial t}=-\frac{\partial i_{Ci}}{\partial l_i},$$

где: $L_{\Phi i}$ – индуктивность контура: фаза линии – обратный эквивалентный провод (земля), обусловленная только магнитным потоком в воздухе, при пренебрежении, ввиду малости, составляющей индуктивности, определяемой магнитным потоком в самом проводе фазы, и в предположении бесконечно большой проводимости земли; L_{3i} – дополнительная индуктивность контура: фаза-земля, обусловленная только магнитным потоком в земле; $M_{M\Phi i}$ – взаимоиндуктивность между любыми двумя из трёх контуров: фаза-земля; $r_{\Phi i}$ – активное сопротивление провода фазы линии; r_{3i} – активное сопротивление обратного эквивалентного провода (земли); $C_{\Phi i}$ – ёмкость провода фазы относительно земли; $C_{M\Phi i}$ – ёмкость между любыми двумя проводами фаз линии; i_{Ai}, i_{Bi}, i_{Ci} – мгновенные значения фазных токов; u_{Ai}, u_{Bi}, u_{Ci} – мгновенные значения фазных напряжений; $i_{0i}=(i_{Ai}+i_{Bi}+i_{Ci})/3$ – мгновенное значение тока нулевой последовательности; $u_{0i}=(u_{Ai}+u_{Bi}+u_{Ci})/3$ – мгновенное значение напряжения нулевой последовательности; l_i – длина i-ой ЛЭП или её участка.

Замена правых частей уравнений системы конечными приращениями напряжений и токов по длине ЛЭП приводит к её модели в виде конечного числа трёхфазных П-образных схем замещения, количество которых определяется длиной ЛЭП и требуемым уровнем адекватности воспроизводимых процессов. Так как при таком методе решения каждый из участков линии отображается аналогичной системой уравнений с модифицированными правыми частями в форме разностей соответствующих напряжений и токов, то в целом математическая модель длинной линии оказывается весьма громоздкой. Поэтому подобный способ моделирования оправдан для сравнительно коротких ЛЭП. Приемлемая для практики точность воспроизведения переходных процессов указанным способом обеспечивается при длине участка или линии в целом l_i<250 км. Более строгое моделирование процессов в ЭЭС, в частности связанных с коммутационными перенапряжениями, предполагает дальнейшее уменьшение этого параметра до значений l_i<50 км.

В общем случае, в связи с необходимостью учёта магнитного и электростатического взаимовлияния параллельных линий или соответствующих участков линий, а также грозозащитных тросов, которое по данным многочисленных исследований проявляется преимущественно в токах и напряжениях нулевой последовательности, оптимальной является запись уравнений в системе несимметричных составляющих α, β, 0. Достоинством такой математической модели, наряду с её компактностью, является естественное, а не дополнительное, наличие уравнений, связывающих параметры, напряжения и токи нулевой последовательности. Последнее позволяет наиболее просто и удобно осуществлять учёт электромагнитного взаимовлияния параллельных цепей.

Для некоторой i-ой ЛЭП или её участка исходная система уравнений в системе α, β, 0 приобретает вид [1]:

$$L_i\frac{\partial i_{\alpha i}}{\partial t}+r_i i_{\alpha i}=-\frac{\partial u_{\alpha i}}{\partial t};\quad C_i\frac{\partial u_{\alpha i}}{\partial t}=-\frac{\partial i_{\alpha i}}{\partial t};$$

$$L_i\frac{\partial i_{\beta i}}{\partial t}+r_i i_{\beta i}=-\frac{\partial u_{\beta i}}{\partial t};\quad C_i\frac{\partial u_{\beta i}}{\partial t}=-\frac{\partial i_{\beta i}}{\partial t};$$

$$L_{0i}\frac{\partial i_{0i}}{\partial t}+r_{0i} i_{0i}=-\frac{\partial u_{0i}}{\partial t};\quad C_{0i}\frac{\partial u_{0i}}{\partial t}=-\frac{\partial i_{0i}}{\partial t};$$

где

$$i_{\alpha i}=\frac{2}{3}i_{Ai}-\frac{1}{3}(i_{Bi}+i_{Ci});\quad u_{\alpha i}=\frac{2}{3}u_{Ai}-\frac{1}{3}(u_{Bi}+u_{Ci});$$

$$i_{\beta i}=\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{Bi}-i_{Ci});\quad u_{\beta i}=\frac{1}{\sqrt{3}}(u_{Bi}-u_{Ci});$$

$$i_{0i}=\frac{1}{3}(i_{Ai}+i_{Bi}+i_{Ci});\quad u_{0i}=\frac{1}{3}(u_{Ai}+u_{Bi}+u_{Ci})$$

– представляют собой мгновенные значения токов и напряжений в системе α, β, 0; L_i и C_i – индуктивность и ёмкость для прямой и обратной последовательностей, именуемые также рабочей индуктивностью и ёмкостью трёхфазной линии; r_i – активное сопротивление трёхфазной линии для прямой и обратной последовательностей, представляющее собой активное сопротивление провода фазы; L_{0i}, C_{0i} и r_{0i} – собственные индуктивность, ёмкость и активное сопротивление i-ой трёхфазной линии для нулевой последовательности.

При этом мгновенные значения фазных величин связанны с составляющими α, β, 0 формулами:

$$i_A=i_0+i_\alpha;\quad u_A=u_0+u_\alpha;$$

$$i_B=i_0-\frac{1}{2}i_\alpha+\frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta;\quad u_B=u_0-\frac{1}{2}u_\alpha+\frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta;$$

$$i_C=i_0-\frac{1}{2}i_\alpha-\frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta;\quad u_C=u_0-\frac{1}{2}u_\alpha-\frac{\sqrt{3}}{2}u_\beta$$

Используемые в уравнениях реактивные и активные параметры ЛЭП определяются многократно апробированными выражениями, которые детально и с учётом возможных исполнений трёхфазных линий рассмотрены в [2]. Особое внимание в этих и других аналогичных работах уделяется параметрам нулевой последовательности в связи со сложной спецификой индуктивного и электростатического взаимодействия линии и земли, а также сравнительно близких параллельных цепей: линий, участков линий, грозозащитных тросов и т.д. В частности, результаты исследований и опыт длительной эксплуатации ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения указывают на целесообразность учёта для нулевой последовательности явления поверхностного эффекта в земле, тогда как в проводах линии им можно пренебрегать.

Активное сопротивление земли, определяемое формулой: $r_з=10^{-4}\pi^2 f$, Ом/км, практически не зависит от удельной проводимости грунта $\gamma=10^{-5}...10^{-2}$ Ом/см$^{-1}$, т.к. изменение последней компенсируется соответствующим изменением сечения, по которому распространяется ток в земле. Глубина расположения эквивалентного обратного провода, имитирующе-

го этот процесс, определяется формулой [2]: $D_з = \frac{2{,}085}{\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-3}}}$, м, полученной для токов возврата фиксированных частот, а индуктивность такого провода, обусловленная магнитным потоком в земле, выражается формулой [2]:

$$L_з = 2\ln\frac{D_з}{2h_{ср}} \cdot 10^{-4},\ Гн/км,$$

где f, Гц, – частота тока возврата, в выражениях для $r_з$ и $D_з$; $h_{ср}$, м, – средняя геометрическая высота проводов фаз над землёй.

Из формул для $r_з$ и $D_з$ очевидна непосредственная зависимость процесса распространения тока в земле от его частоты, а также возможность отображения этого процесса с помощью эквивалентного обратного провода, состоящего из параллельных $r_зD_з$-ветвей с распределёнными или сосредоточенными параметрами.

Согласно данным [1] моделирование эквивалентного обратного провода тремя параллельными $r_зD_з$-ветвями обеспечивает достаточную точность в диапазоне частот до 1000 Гц, что охватывает весь реальный спектр переходных процессов в ЭЭС, включая коммутационные перенапряжения. Расчёт параметров указанных $r_зD_з$-ветвей осуществляется исходя из условия:

$$\sum_{k=1}^{3}\frac{1}{r_{зk} + j\omega L_{зk}} = \frac{1}{r_{зk}(\omega_k) + j\omega L_з(\omega_k)},$$

где $r_{зk}$, $L_{зk}$ – искомые параметры $r_зD_з$-ветвей, которые определяются в результате решения системы из шести алгебраических уравнений (три для $r_{зk}$ и три для $L_{зk}$) для трёх значений ω_k, обычно: 70, 200, 800 Гц.

Принимая во внимание уточняющий характер учёта поверхностного эффекта в земле и связанное с этим усложнение математической модели линии, следует считать целесообразным его применение только для собственных параметров нулевой последовательности линии, включая грозозащитные тросы, учёт которых не изменяет структуры математической модели, а лишь влияет на значения указанных параметров. Что касается электромагнитного взаимовлияния параллельных линий, участков, то этот фактор, согласно многочисленным данным, считается достаточным учитывать традиционным способом, предполагающим для каждого индуктируемого тока нулевой последовательности одну $r_{ij}L_{ij}$-ветвь.

Рассмотренные аспекты математического моделирования ЛЭП определяют и характеризуют два возможных варианта решения этой задачи. В соответствии с одним из них основу математической модели составляет какая-либо из приведенных выше систем уравнений, записанная для конечных приращений напряжений и токов в правой части уравнений, которая в этом случае отображает процессы в линии или участке с сосредоточенными параметрами в виде П-образной схемы замещения. При этом, качество моделирования процессов, определяемое спектром воспроизводимых гармоник, зависит, как уже отмечалось, от длины линии и связанного с ней количества участков. Поскольку такая информация априори доступна лишь применительно к конкретной ЭЭС, то очевидно, что и данный вариант, без всегда нежелательной избыточности, приемлем именно для таких условий.

В общем случае, предполагающем универсальность использования математической модели трёхфазной линии безотносительно к её параметрам и спектру воспроизводимых процессов, особенно их высокочастотной части, наиболее эффективен и удобен другой способ применения этих систем уравнений, в частности для α, β, 0, учитывающий распределённость параметров линии электропередачи и поверхностный эффект в земле.

Теоретическую основу обозначенного способа составляет волновая интерпретация процессов в этих цепях, которая позволяет представить исходную модель системой уравнений:

$$U_{\xi Нi}(p) - Z_{\xi i} I_{\xi Нi}(p) = [\,U_{\xi Кi}(p) - Z_{\xi i} I_{\xi Кi}(p)]\, e^{-p\tau_{\xi i}} e^{-\sigma_{\xi i}};$$

$$U_{\xi Кi}(p) + Z_{\xi i} I_{\xi Кi}(p) = [\,U_{\xi Нi}(p) + Z_{\xi i} I_{\xi Нi}(p)]\, e^{-p\tau_{\xi i}} e^{-\sigma_{\xi i}},$$

где Н и К – обозначение условного начала и конца линии или её участка; ξ – индекс составляющих системы α, β, 0; $Z_{\xi i} = \sqrt{\frac{L_{\xi i}}{C_{\xi i}}}$ – волновое сопротивление идеализированной линии для соответствующих составляющих системы α, β, 0; $\tau_{\xi i} = l_i\sqrt{L_{\xi i}C_{\xi i}}$ – постоянная изменения фазы волны соответствующих составляющих системы α, β, 0 в идеализированной линии длиной l_i;

$$\sigma_{\xi i} = \left(\frac{r_{\xi i}}{2Z_{\xi i}} + \frac{g_{\xi i}}{2}Z_{\xi i}\right)\cdot l_i$$

– параметр затухания соответствующих составляющих системы α, β, 0, обусловленного потерями в реальной линии длиной l_i из-за $r_{\xi i}\neq 0$ и $g_{\xi i}\neq 0$.

Модификация системы уравнений, необходимая для учёта поверхностного эффекта в земле, вытекает из содержания выражений, определяющих $Z_{\xi i}$, $\tau_{\xi i}$, $\sigma_{\xi i}$ для нулевой последовательности: Z_{0i}, τ_{0i}, σ_{0i} и рассмотренного ранее способа отображения распространения токов нулевой последовательности фиксированных частот посредством трёх параллельных $r_{зi}L_{зi}$-ветвей: $r'_зL'_з$, $r''_зL''_з$, $r'''_зL'''_з$.

Замена в выражениях $Z_{\xi i}$, $\tau_{\xi i}$, $\sigma_{\xi i}$ для Z_{0i}, τ_{0i}, σ_{0i}, $r_{зi}$ и $L_{зi}$ на $r'_{зi}$, $L'_{зi}$ приводит к образованию формул для параметров нулевой последовательности:

$$Z'_{0i} = \sqrt{\frac{L'_{0i}}{C_{0i}}} = \sqrt{\frac{L_{0в\,i} + L'_{з\,i}}{C_{0i}}};$$

$$\tau'_{0i} = l_i\sqrt{L'_{0i}C_{0i}} = l_i\sqrt{(L_{0в\,i} + L'_{з\,i})C_{0i}};$$

$$\sigma'_{0i} = \left(\frac{r_{фi} + 3r'_{зi}}{2Z'_{0i}} + \frac{g_{0i}}{2}Z'_{0i}\right)\cdot l_i$$

и аналогичных для $r_з''$, $L_з''$, $r_з'''$, $L_з'''$ и соответственно трёх волновых каналов нулевой последовательности с этими параметрами.

Для учета электромагнитного взаимодействия, проявляющегося в появлении в напряжениях нулевой последовательности i-ой параллельной цепи:

$$U_{\text{Н}ii}(t)=\frac{1}{3}[U_{A\text{Н}i}(t)+U_{B\text{Н}i}(t)+U_{C\text{Н}i}(t)];$$

$$U_{\text{К}ii}(t)=\frac{1}{3}[U_{A\text{К}i}(t)+U_{B\text{К}i}(t)+U_{C\text{К}i}(t)],$$

кроме составляющих этого напряжения $U_{0\text{Н}i}(t)$ и $U_{0\text{К}i}(t)$, обусловленных распространением собственного тока нулевой последовательности i-ой цепи $i_{0\text{Н}i}(t)$ и $i_{0\text{К}i}(t)$, а с учётом поверхностного эффекта в земле: $i_{0\text{Н}i}'(t)$, $i_{0\text{Н}i}''(t)$, $i_{0\text{Н}i}'''(t)$ и $i_{0\text{К}i}'(t)$, $i_{0\text{К}i}''(t)$, $i_{0\text{К}i}'''(t)$, соответственно, дополнительных составляющих: $U_{\text{Н}i1}(t),U_{\text{К}i1}(t);...;U_{\text{Н}ij}(t),U_{\text{К}ij}(t);...;U_{\text{Н}in}(t),U_{\text{К}in}(t)$, образованных распространением токов нулевой последовательности: $i_{0\text{Н}1}(t),i_{0\text{К}1}(t);...;i_{0\text{Н}j}(t),i_{0\text{К}j}(t);...;i_{0\text{Н}n}(t),i_{0\text{К}n}(t)$, влияющих цепей: $1,...,j,...,n$ по соответствующим взаимным волновым каналам, математическая модель i-ой многоцепной ЛЭП должна содержать, помимо рассмотренных ранее основных уравнений, дополнительные уравнения, обеспечивающие формирование напряжений: $U_{0\text{Н}i}(t)$ и $U_{0\text{К}i}(t)$ указанным выше образом.

С учетом вышеизложенного, ранее записанная система уравнений приобретает вид:

$$U_{\alpha\text{Н}i}(t)-Z_i i_{\alpha\text{Н}i}(t)=[U_{\alpha\text{К}i}(t-\tau_i)-Z_i i_{\alpha\text{К}i}(t-\tau_i)]\cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\alpha\text{К}i}(t)+Z_i i_{\alpha\text{К}i}(t)=[U_{\alpha\text{Н}i}(t-\tau_i)+Z_i i_{\alpha\text{Н}i}(t-\tau_i)]\cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\beta\text{Н}i}(t)-Z_i i_{\beta\text{Н}i}(t)=[U_{\beta\text{К}i}(t-\tau_i)-Z_i i_{\beta\text{К}i}(t-\tau_i)]\cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{\beta\text{К}i}(t)+Z_i i_{\beta\text{К}i}(t)=[U_{\beta\text{Н}i}(t-\tau_i)+Z_i i_{\beta\text{Н}i}(t-\tau_i)]\cdot e^{-\sigma_i};$$

$$U_{0\text{Н}i}(t)-Z_{0i}' i_{0\text{Н}i}'(t)=[U_{0\text{К}i}(t-\tau_{0i}')-Z_{0i}' i_{0\text{К}i}'(t-\tau_{0i}')]\cdot e^{-\sigma_{0i}'};$$

$$U_{0\text{К}i}(t)-Z_{0i}' i_{0\text{К}i}'(t)=[U_{0\text{Н}i}(t-\tau_{0i}')+Z_{0i}' i_{0\text{Н}i}'(t-\tau_{0i}')]\cdot e^{-\sigma_{0i}'}$$

и далее по аналогии для Z_{0i}'', τ_{0i}'', σ_{0i}'', Z_{0i}''', τ_{0i}''', σ_{0i}''', в которых:

$$i_{0\text{Н}i}(t)=i_{0\text{Н}i}'(t)+i_{0\text{Н}i}''(t)+i_{0\text{Н}i}'''(t);$$

$$i_{0\text{К}i}(t)=i_{0\text{К}i}'(t)+i_{0\text{К}i}''(t)+i_{0\text{К}i}'''(t);$$

$$U_{0\text{Н}i}(t)=U_{\text{Н}ii}(t)-U_{\text{Н}i1}(t)-...-U_{\text{Н}ij}(t)-...-U_{\text{Н}in}(t);$$

$$U_{0\text{К}i}(t)=U_{\text{К}ii}(t)-U_{\text{К}i1}(t)-...-U_{\text{К}ij}(t)-...-U_{\text{К}in}(t);$$

$$U_{\alpha\text{Н}i}(t)=\frac{2}{3}U_{A\text{Н}i}(t)-\frac{1}{3}[U_{B\text{Н}i}(t)+U_{C\text{Н}i}(t)];$$

$$U_{\beta\text{Н}i}(t)=\frac{1}{\sqrt{3}}[U_{B\text{Н}i}(t)-U_{C\text{Н}i}(t)];$$

$$U_{\text{Н}ii}(t)=\frac{1}{3}[U_{A\text{Н}i}(t)+U_{B\text{Н}i}(t)+U_{C\text{Н}i}(t)];$$

$$U_{\alpha\text{К}i}(t)=\frac{2}{3}U_{A\text{К}i}(t)-\frac{1}{3}[U_{B\text{К}i}(t)+U_{C\text{К}i}(t)];$$

$$U_{\beta\text{К}i}(t)=\frac{1}{\sqrt{3}}[U_{B\text{К}i}(t)-U_{C\text{К}i}(t)];$$

$$U_{\text{К}ii}(t)=\frac{1}{3}[U_{A\text{К}i}(t)+U_{B\text{К}i}(t)+U_{C\text{К}i}(t)];$$

$$i_{A\text{Н}i}(t)=i_{0\text{Н}i}+i_{\alpha\text{Н}i};\quad i_{B\text{Н}i}(t)=i_{0\text{Н}i}(t)-\frac{1}{2}i_{\alpha\text{Н}i}(t)+\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta\text{Н}i}(t);$$

$$i_{C\text{Н}i}(t)=i_{0\text{Н}i}(t)-\frac{1}{2}i_{\alpha\text{Н}i}(t)-\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta\text{Н}i}(t);$$

$$i_{A\text{К}i}(t)=i_{0\text{К}i}+i_{\alpha\text{К}i};\quad i_{B\text{К}i}(t)=i_{0\text{К}i}(t)-\frac{1}{2}i_{\alpha\text{К}i}(t)+\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta\text{К}i}(t);$$

$$i_{C\text{К}i}(t)=i_{0\text{К}i}(t)-\frac{1}{2}i_{\alpha\text{К}i}(t)-\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta\text{К}i}(t).$$

где $Z_i=Z_{\alpha i}=Z_{\beta i}=\sqrt{\frac{L_i}{C_i}}$ – волновое сопротивление для составляющих α, β такое же, как и для составляющих прямой и обратной последовательностей, а $f(t-\tau_{\xi i})$ – функция запаздывания.

Полученная система уравнений учитывает все ранее названные факторы, за исключения коронирования ЛЭП, которое связанно с возникновением при определенных условиях объемного заряда на проводах ЛЭП, описываемого соответствующими вольт-кулоновыми характеристиками. Однако, если иметь в виду, что коронирование приводит к динамическому изменению активной проводимости между проводом и землей, и емкости, то влияние короны можно учесть путем динамической коррекции параметров математической модели "g" и "C", в выражениях

$$Z_{\xi i}=\sqrt{\frac{L_{\xi i}}{C_{\xi i}}},\ \tau_{\xi i}=l_i\sqrt{L_{\xi i}C_{\xi i}}\ \text{ и }\ \sigma_{\xi i}=\left(\frac{r_{\xi i}}{2Z_{\xi i}}+\frac{g_{\xi i}}{2}Z_{\xi i}\right)l_i,$$

которые вычисляются по формулам [1, 3]:

– динамическая активная проводимость коронирующего провода:

$$g=\left(\frac{f}{50}\right)^{0,62}\left[1-\exp\left(-3,05\frac{U_m-U_{\text{нач}}}{U_{\text{нач}}}\right)\right]10^{-3},\ \text{МОм·м};$$

где U_m – мгновенное значение фазного напряжения; f – частота; $U_{\text{нач}}$ – начальное напряжение короны, определяемое выражением [3]:

$$U_{\text{нач}}=E_{\text{нач}}R\ln\frac{2H}{R},\ \text{кВ},$$

в котором H – высота провода над землей, а R – радиус провода; $E_{\text{нач}}$ – начальная напряженность электрического поля при коронном разряде, вычисляемая по формуле [3]:

$$E_{\text{нач}}=24,5m\delta\left[1+\frac{0,65}{(\delta R)^{0,38}}\right],\ \text{кВ/см},$$

где m=0,82...0,94 – коэффициент гладкости провода; δ – относительная плотность воздуха;

– динамическая емкость коронирующего провода [3]:

$$C=C_{\text{г}}+2,4\left(\frac{50}{f}\right)^{0,42}\left(\frac{U_m}{U_{\text{нач}}}-1\right),\quad \text{пФ/м};$$

где $C_{\text{г}}$ – обычная геометрическая емкость провода.

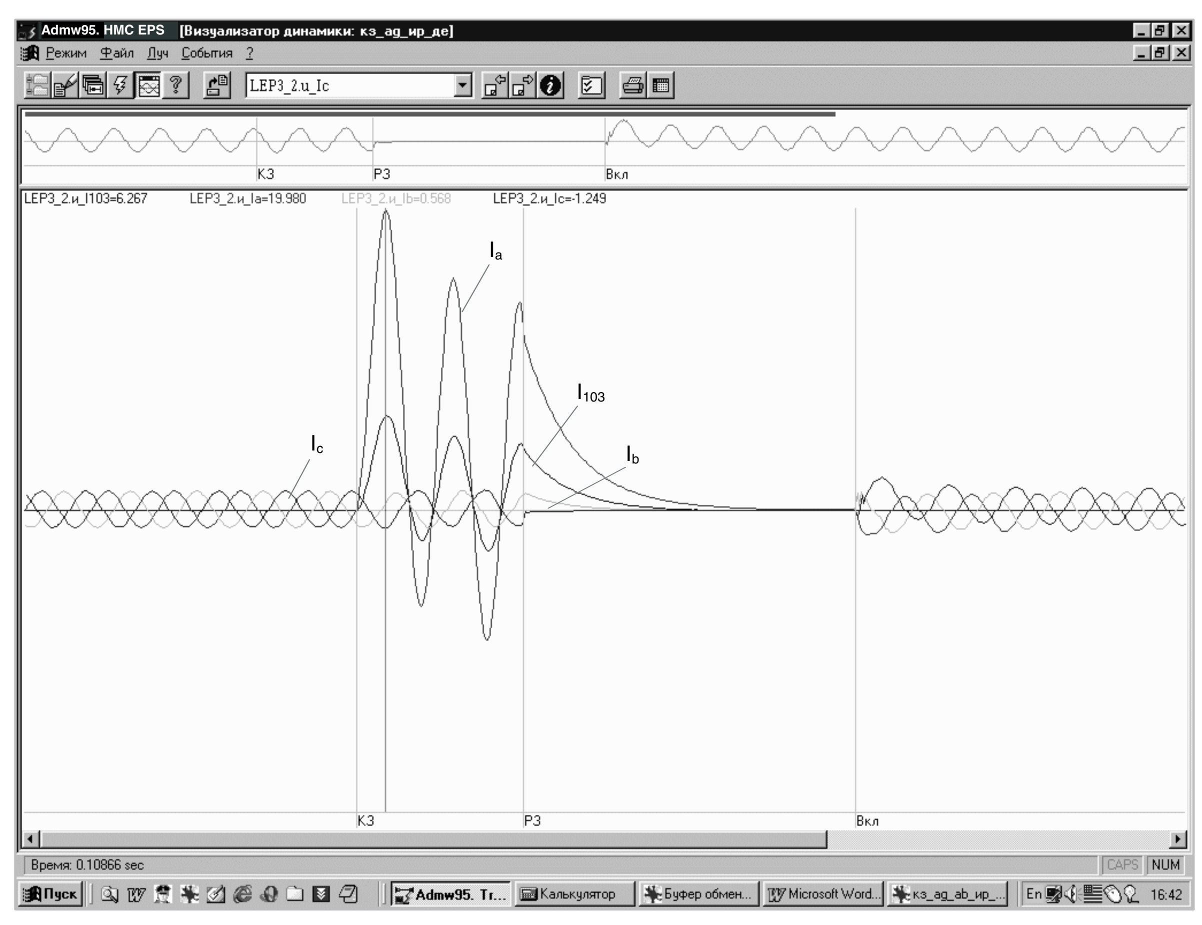


Рисунок. *Пример осциллограммы однофазного короткого замыкания в ЛЭП 500 кВ (LEP3_2), где: LEP3_2.Ia, LEP3_2.Ib, LEP3_2.Ic – фазные токи; LEP3_2.I103 – ток нулевой последовательности*

Заключение

В результате рассмотренного синтеза получена универсальная всережимная математическая модель ЛЭП, позволяющая воспроизводить непрерывный спектр нормальных и аварийных процессов в линиях любой протяженности и различных классов напряжения с учетом уточненного электромагнитного взаимовлияния параллельных цепей и возможного коронирования ЛЭП. Применение трех параллельных волновых каналов для нулевой последовательности существенно повышает точность моделирования наиболее вероятных в эксплуатации ЭЭС несимметричных аварийных процессов, включая коммутационные перенапряжения.

Разработанная модель может использоваться при проведении расчетов как численными методами и средствами, так и гибридными. Последнее реализовано в гибридных процессорах ЛЭП всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС гибридного типа, разработанного в НИЛ «Моделирование ЭЭС» Электротехнического института Томского политехнического университета.

Экспериментальная проверка гибридных процессоров ЛЭП в составе моделирующего комплекса Тюменской энергосистемы подтвердила адекватность синтезированной модели ЛЭП для всего спектра воспроизводимых процессов, фрагмент которых для наиболее распространенного вида аварий приведен на рисунке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караев Р.И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. – М.: Энергия, 1978. – 191 с.
2. Лосев С.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1983. – 528 с.
3. Базутник В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. – М.: Энергоиздат, 1983. – 328 с.